



DEUTSCHES
PATENTAMT

21 Aktenzeichen: P 44 12 994.7-52
22 Anmeldetag: 15. 4. 94
43 Offenlegungstag: —
45 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 17. 8. 95

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

- 73 Patentinhaber:
Universität Leipzig, 04109 Leipzig, DE
- 74 Vertreter:
Krause, R., Dipl.-Phys., Pat.-Ass., O-7010 Leipzig
- 72 Erfinder:
Jacobs, Franz, Prof. Dr., 04103 Leipzig, DE;
Danckwardt, Erik, Dr., 04347 Leipzig, DE; Petzold,
Günter, Dipl.-Geophys., 04105 Leipzig, DE
- 56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:
DE 32 34 609 A1
US 44 46 434
McCANN, D.M., et al., The use of geophysical
surveying methods in the detection of natural
cavities and mineshafts, in: Quarterly Journal of
Engineering Geology, Vol.20, 1987, S.59-73;

KRAJEWSKI, Ch., Iterative tomographic methods to
locate seismic low-velocity anomalies: a model
study, in: Geophysical Prospecting 37, 1989,
S. 717-751;
JACOBS, F., Geoelektrische Erkundung von
Lagerungsstörungen in Lockergesteine, in: Geophys.
u. Geol., Bd. III, H.4, 1987, S.161-195;
LEIBRING Dr., B., Unterirdische Hohlräume in
Lößlehmgebieten und innerstädtische Bebauung -
eine aktuelle Problematik, in: Bautzeitung 43, 1989,
11, S.504 ff;

- 54 Verfahren und Anordnung zur räumlichen Erkundung und Untersuchung unterirdischer Objekte und
Schichten

- 57 Ausgehend von den bekannten Verfahren und Anordnun-
gen zur Darstellung geoelektrischer Widerstände und Leitfä-
higkeiten im Untergrund will die Erfindung die Auflösung
erhöhen und hierbei auch räumliche dreidimensionale Dar-
stellungen erreichen. Die räumliche Erkundung und Untersu-
chung unterirdischer Objekte und Schichten soll weitgehend
automatisiert, störresistent, schnell und umweltschonend
von der Erdoberfläche aus durchführbar sein.
Erfindungsgemäß wird eine Vielzahl von kreisförmig ange-
ordneten Dipolen eingesetzt, die durch eine Steuerungsein-
heit in der Weise geschaltet werden, daß aus der Vielzahl
immer ein Dipol als Stromdipol und alle anderen als
Sondendipole definiert werden. Nach Erfassung der Span-
nungswerte der Sondendipole wechselt der Stromdipol auf
einen benachbarten Dipol. Aus den erfaßten Daten ergibt
sich ein dreidimensionaler Datensatz, der weiter ausgewer-
tet wird.
Es können sowohl verdeckte Körper als auch physikalisch-
chemische Inhomogenitäten im Boden, im Grundwasser
oder im Gestein sondiert werden. Der hohe Grad der
räumlichen Auflösung ermöglicht die Suche nach und die
Vermessung von Hohlräumen, die Untersuchung von Bau-
grund, Bergbaurelikten und Deponien und die Suche nach
und die Ausbreitung von Schadstoffen und Altlasten. Eben-
so ist die Erkundung und Untersuchung von archäologischen
Objekten sowie von Vulkanen und Erdbebenherden möglich.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Anordnung zur räumlichen Erkundung und Untersuchung unterirdischer Objekte und Schichten. Das können sowohl verdeckte Körper als auch physikalisch-chemische Inhomogenitäten im Boden, im Grundwasser oder im Gestein sein. Der hohe Grad der räumlichen Auflösung ermöglicht beispielsweise die Suche nach und die Vermessung von Hohlräumen, die Untersuchung von Baugrund, Bergbaurelikten und Deponien und die Suche nach und die Ausbreitung von Schadstoffen und Altlasten. Ebenso ist die Erkundung und Untersuchung von archäologischen Objekten sowie von Vulkanen und Erdbebenherden möglich.

Seit jeher besteht ein großes Interesse an der Erkundung und Untersuchung unterirdischer Objekte und Schichten. Hierzu wurden eine Vielzahl unterschiedlicher geophysikalischer Meßverfahren und Meßanordnungen entwickelt, wie z. B. Gravimetrie, Geothermie, Geoelektrik, Elektromagnetik, Emanometrie, Seismik usw. Trotz der zum Teil akut anstehenden Problemstellungen, wie etwa Schadstellen durch Schadstoffe und Altlasten, prophylaktische Erkundung von bergbauschadengefährdeten Gebieten und Baugrunduntersuchungen in mittelalterlichen Stadtgebieten, ist ein umfassender oder Routineeinsatz der Geophysik bisher nicht zu verzeichnen.

Aus der Literatur ist bekannt, daß hinreichend zuverlässige Aussagen nach wie vor nur durch die komplexe Anwendung verschiedener Verfahren in Kombination mit Bohrlochmessungen bei entsprechend hohem Aufwand möglich sind (McCann, D. M. et al.: The use of geophysical surveying methods in the detection of natural cavities and mineshafts. Quart. J. Eng. Geol. Vol. 20 (1987) S. 59—73).

Die Kenntnis unterirdischer Hohlräume unter Städten und Gemeinden oder historischen Gebäuden ist aus Sicht der öffentlichen Sicherheit, der Erschließung innerstädtischer Baustandorte und der Rekonstruktion alter Stadtkerne einschließlich für die Anlage von Verkehrswegen und Leitungstrassen von großer Bedeutung. Besonders schwierig ist die Begutachtung von abgemauerten oder in historischer Zeit teilweise verfüllten Hohlräumen von der Erdoberfläche aus oder aus Gebäuden. Mit den bisher in der geophysikalischen Erkundungspraxis genutzten Verfahren können Hohlräume nur dann nachgewiesen werden, wenn das Verhältnis zwischen Hohlraumdurchmesser und Teufenlage 1:1 bis maximal 1:2 beträgt. Außerdem ist Voraussetzung, daß die physikalischen Kontraste zwischen Hohlraum und Umgebung mindestens etwa 1:10 sind (Leißing, B.: Unterirdische Hohlräume in Lößlehmgeländen und innerstädtische Bebauung — eine aktuelle Problematik. Bauzeitung 43 (1989) 11).

Aus Krajewski, L. et al.: Iterative tomographic methods to locate seismic low velocity anomalies: A model study. Geophysical prospecting 37, 717—751, 1989 sind tomographische seismische Verfahren zur Erkundung und Untersuchung des Bodens bekannt. Bekannt ist die Verwendung von seismischen Erschütterungswellen. Die von einer Quelle ausgesandten elastischen Wellen/Strahlen werden auf Grund ihrer unterschiedlichen Geschwindigkeit im Medium zum Träger von Informationen, die bei geeignetem Empfang zur räumlichen Darstellung der durchstrahlten Körper und Inhomogenitäten dienen können. Seismische Wellen haben auf Grund ihrer Wellenlänge jedoch nur ein begrenztes Auflö-

sungsvermögen, das selten unter 10 m liegt. Die aufgrund der Dämpfung herabgesetzte Eindringtiefe der Wellen kann nicht durch eine erhöhte Energieabstrahlung der Quellen (Explosion, Schlag, Fallgewicht) beliebig gesteigert werden. Eine Reihe von teilweise schwer abschätzbaren Größen beeinflussen die Ergebnisse, so immer vorhandene natürliche und künstliche Erschütterungen sowie die Abstrahlcharakteristik und die Ankopplung der Quelle und der Sensoren. Weitere Beeinträchtigungen kommen durch nicht vermeidbare, filterbedingte Zeitverzögerungen in der Empfangsapparatur und die fehlende Möglichkeit zum Echtzeitbetrieb infolge des Datenprozessings zustande. Schließlich ist die Durchführung der Messungen im Gelände in der Regel mit einem erheblichen Meßaufwand verbunden. Insbesondere ist eine Automatisierung des Ablaufes aufgrund der räumlich und zeitlich wechselnden Anregungen von seismischen Wellen nicht möglich.

Die aus der Medizin bekannte Computertomographie unter Verwendung von Strahlen im Röntgen- und Ultraschallbereich hat sich für Messungen im Boden als wenig vorteilhaft erwiesen, weil der Boden die Energie dieser Strahlen so stark dämpft, daß diese nicht tief genug in das Medium eindringen können. Weiterhin sind geoelektrische Messungen bekannt, bei denen elektrischer Strom über Erdungen (Stromdipol) in den Boden eingespeist wird. In der Umgebung der Elektroden baut sich ein elektrisches Feld auf, das von einem Spannungsdipol ausgemessen wird (Vierpunktmessungen). Aus der Messung von Strom und Spannung wird unter Berücksichtigung von Geometriefaktoren der elektrische Widerstand bzw. die Leitfähigkeit des Untergrundes bestimmt. Der gemessene Widerstand repräsentiert die integralen, entfernungsabhängigen Einflüsse der verschiedenen Komponenten des geologischen Untergrundes (scheinbarer spezifischer Widerstand). Aus Jacobs, F. u. a.: Geoelektrische Erkundung von Lagerungsstörungen in Lockergesteinen. Geophys. und Geol., III/4, 161—195, 1987 ist die Verwendung der geoelektrischen Widerstandsmessung für flächendeckende Kartierungen oder linienförmige Sondierungen bekannt. Als Nachteil der geoelektrischen Widerstandsverfahren erweist sich deren Ungenauigkeit bei der Abschätzung der Tiefenlage von Körpern und Inhomogenitäten, da flächendeckende Kartierungen Projektionen der wahren Widerstände an die Erdoberfläche darstellen. Dagegen sind linienförmige Sondierungen Projektionen der wahren Widerstände in eine Vertikalebene, die jedoch die Tiefenlage systematisch verzerrt abbilden. Der Einfluß lateraler Widerstandsänderungen ist nicht korrigierbar. Somit erlaubt auch die Kombination beider Widerstandsverfahren keine widerstands- und lagegetreue Abbildung von Störkörpern im Untergrund.

Aus der DE 32 34 609 A1 ist ein geoelektrisches Anschlußverfahren und eine Einrichtung zu dessen Durchführung bekannt, bei dem über ein an eine Stromquelle angeschlossenes Einzelleiterkabel in Längsrichtung auseinanderliegende Anschlußpunkte mit von einer Zentraleinheit aus adressierbaren Schalteinheiten mit Erdsonden verbunden sind. Das Ziel besteht darin, bei Sondierung mit einer großen Anzahl von Sonden den technischen Aufwand des im Feld auszulegenden Teils der Meßanordnung zu verringern. Die Anordnung der empfindlichen Elektronik in Verbindung mit den im Gelände auszubringenden Sonden erweist sich unter den rauen Feldbedingungen jedoch als störanfällig. Diesem wie auch den übrigen Verfahren ist gemeinsam, daß sie die Meßwerte dem Mittelpunkt der Meßanordnung zuord-

nen — und zwar auf einer Vertikallinie unterhalb des Mittelpunktes. Eine scheinbar zweidimensionale Wider-
spiegelung des Untergrundes wird erreicht, in dem meh-
rere dieser eindimensionalen Vertikallinien in einer Ver-
tikalebene dargestellt und durch grafische Interpolation
verbunden werden. Jedoch wird der grundsätzliche Feh-
ler bei der eindimensionalen Darstellung gegenüber der
dreidimensionalen Realität dadurch nicht beseitigt.

Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, ausgehend
von den bekannten Verfahren und Anordnungen zur
Darstellung geoelektrischer Widerstände und Leitfähig-
keiten im Untergrund deren Auflösung zu erhöhen und
hierbei auch räumliche dreidimensionale Darstellungen
zu erreichen, wobei die räumliche Erkundung und Un-
tersuchung unterirdischer Objekte und Schichten weit-
gehend automatisiert, störresistent, schnell und umwelt-
schonend von der Erdoberfläche aus durchführbar sein
soll.

Zur Lösung dieser Aufgabe werden in dem unabhän-
gigen Anspruch 1 ein Verfahren und in dem unabhän-
gigen Anspruch 6 eine Anordnung zur räumlichen Erkun-
dung und Untersuchung unterirdischer Objekte und
Schichten vorgeschlagen.

Die Aufgabe wird gemäß Anspruch 1 durch ein Ver-
fahren zur räumlichen Erkundung und Untersuchung
unterirdischer Objekte und Schichten gelöst, bei dem
elektrischer Strom über eine als Stromdipol ausgebilde-
te Erdung in den Boden eingespeist wird. Das sich als
Folge aufbauende elektrische Feld wird mittels eines
Sondendipols gemessen. Aus der Messung von Strom
und Spannung wird der elektrische Widerstand bzw. die
Leitfähigkeit des Untergrundes bestimmt. Erfindungs-
gemäß werden zur Durchführung des Verfahrens eine
Vielzahl von paarweise zu Dipolen zusammengeschalte-
ten Elektroden eingesetzt. Diese Elektroden werden
einfach oder mehrfach eine geschlossene Linie bildend
angeordnet. Der diagonale Abstand ist abhängig von
der zu sondierenden Tiefe und bestimmt sich annähernd
zu Länge der halben Diagonale gleich Tiefe. Gegeben-
enfalls werden in dem durch die Dipole gebildeten Ar-
ray eine oder mehrere Mehrpol-Vertikalelektroden in
den Untergrund getrieben. Die ausgelegten Dipole wer-
den über eine elektronisch getaktete Steuerung mit
Gleichstrom oder niederfrequentem Wechselstrom
("Quasi"-Gleichstrom) in der Weise angesteuert, daß die
Steuerungseinheit immer einen Dipol aus der Vielzahl
der Dipole als Stromdipol und alle anderen als Sonden-
dipole definiert. Bei der Verwendung von niederfre-
quentem Wechselstrom bis zu einer Frequenz von etwa
100 Hz ist die Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes ge-
geben, so daß die gemessenen komplexen Widerstände
nicht von verfälschenden und die spätere Auswertung
komplizierenden Induktions- oder Skineffekten überla-
gert werden. Die Spannungswerte der einzelnen Son-
dendipole werden nacheinander ein- oder mehrkanalig
durch das mit der Steuerungseinheit verbundene Meß-
gerät mit Datenlogger erfaßt. Nach Abschluß der Erfas-
sung der Werte aller Sondendipole bestimmt die Steue-
rungseinheit einen benachbarten Dipol als Stromdipol
und danach werden wiederum die Spannungswerte der
als Sondendipole verbleibenden Dipole erfaßt. Die
Steuerungseinheit führt diesen Wechsel des Stromdi-
pols solange durch, bis alle Dipole mindestens einmal als
Stromdipol durch die Steuerungseinheit definiert waren
(Rotationssondierung). Daran schließt sich die Auswer-
tung der erfaßten Strom- und Spannungswerte an, in-
dem mittels eines potentialtomographischen Bildrekon-
struktionsverfahrens die von den Dipolpaaren an der

Erdoberfläche gemessenen scheinbaren spezifischen
Widerstände im Zuge eines Inversionsverfahrens aus
dem erregenden elektrischen Feld in die lagegetreue
Quellverteilung der wahren spezifischen Widerstände
im Untergrund transformiert und räumlich dargestellt
werden. Aus dem dreidimensionalen Datensatz lassen
sich beliebige, meist horizontale oder vertikale Schnitt-
flächen ausgeben und zur weiteren Auswertung bereit-
stellen.

Das erfindungsgemäße Verfahren wird in den An-
sprüchen 2 bis 5 weiter vorteilhaft ausgestaltet.

Besonders günstig ist das Verfahren durchführbar,
wenn die Dipole kreisförmig um den Mittelpunkt oder
gegebenenfalls um die als Mittenelektrode eingesetzte
Mehrpole-Vertikalelektrode angeordnet werden.

Die in der Praxis häufig geforderte flächenhafte Son-
dierung ausgedehnter Objekte und Schichten wird ver-
fahrensgemäß dadurch möglich, indem die Dipole nach
Beendigung der Erfassung der Spannungswerte ent-
sprechend Anspruch 1 seitlich versetzt und erneut die
Spannungswerte aufgenommen werden. Der Wechsel
erfolgt solange, bis das Objekt bzw. die Schicht in seiner
vollen Ausdehnung erfaßt ist.

Zur Verbesserung der Auflösung in z-Richtung wer-
den innerhalb des durch die Dipole gebildeten Arrays
oder bei kreisförmig angeordneten Dipolen im Mittel-
punkt eine oder mehrere Mehrpole-Vertikalelektroden
senkrecht in den Untergrund getrieben. Die Mehrpole-
Vertikalelektroden weisen eine Vielzahl von durch Iso-
latoren voneinander getrennten Elektroden auf. Diese
Elektroden werden einzeln oder paarweise als Dipole
nacheinander von der Steuerungseinheit mit einem
Strom definierter Stärke beaufschlagt und das sich auf-
bauende Feld wird durch die Sondendipole erfaßt und
wie bereits beschrieben ausgewertet.

Zur Fokussierung des sich durch den Stromdipol aus-
bildenden Feldes wird durch die Steuerungseinheit auf
beiden Seiten des Stromdipols je ein benachbarter Di-
pol zusätzlich mit Strom beaufschlagt.

Die Erfindung beschränkt sich nicht nur auf die Schaf-
fung eines Verfahrens zur räumlichen Erkundung und
Untersuchung unterirdischer Objekte und Schichten.
Ein weiteres Ziel besteht darin, eine Meßanordnung
darzustellen.

Die Meßanordnung besteht aus Stromdipol und Son-
dendipol in Verbindung mit Meßgeräten zur Erfassung
von Strom und Spannung mit dem Ziel der Bestimmung
des elektrischen Widerstandes bzw. der Leitfähigkeit
des Untergrundes. Erfindungsgemäß sind eine Vielzahl
von wechselseitig als Strom- oder Sondendipol einsetz-
baren Dipolen einfach oder mehrfach über dem zu er-
kundenden oder zu untersuchenden Untergrund so an-
geordnet, daß sie eine geschlossene Linie bilden. Die
Größe des diagonalen Abstandes richtet sich nach der
Sondierungstiefe. Innerhalb des sich bildenden Arrays
sind gegebenenfalls eine oder mehrere Mehrpole-Verti-
kalelektroden angeordnet. Die Dipole sind über Verbin-
dungskabel mit einer Steuerungseinheit verbunden, die
jeweils einen der Dipole als Stromdipol und die verblei-
benden als Sondendipole und deren nachfolgenden
Wechsel festlegt. Der Steuerungseinheit sind Meßgerä-
te für Strom und Spannung, Datenlogger und Strom-
quelle sowie eine Einheit zur Erfassung der Strom- und
Spannungswerte und deren nachfolgende Verarbeitung
nach einem Bildrekonstruktionsverfahren nachgeschal-
tet.

Als besonders vorteilhaft erweist sich eine Anord-
nung, bei der die Dipole kreisförmig um den Mittel-

punkt oder gegebenenfalls um die als Mittenelektrode ausgebildete Mehrpol-Vertikalelektrode angeordnet sind.

Es ist günstig, wenn der Dipolabstand im Verhältnis zum Radius der kreisförmig angeordneten Dipole im Bereich zwischen 1 : 5 und 1 : 10 liegt.

Mit dem Ziel der Verbesserung der Auflösung in z-Richtung wird vorteilhaft ein linienförmiges Mehr-elektrodensystem als Mehrpol-Vertikalelektrode eingesetzt, auf der durch Isolatoren getrennte Elektroden angeordnet sind, die mit der Steuerungseinheit über Verbindungskabel verbunden sind.

Weiterhin kann es zur Verbesserung der Auflösung günstig sein, wenn durch die Steuerungseinheit die dem Stromdipol benachbarten Dipole beidseitig als zusätzliche Stromquelle geschaltet sind.

Das erfindungsgemäße Verfahren und die Anordnung ermöglichen eine hohe räumliche Auflösung bei der dreidimensionalen Darstellung von geoelektrischen Widerständen/Leitfähigkeiten im Untergrund. Normalerweise wird eine kreisförmige Anordnung der Dipole angestrebt werden, die aus Sicht der späteren Auswertung der Meßwerte das Verfahren besonders vorteilhaft gestaltet. Zur Anpassung an komplizierte Feldmeßbedingungen infolge begrenzter Meßflächen oder erhöhter Übergangswiderstände ist jedoch auch eine andere Anordnung der Dipole möglich, die ein entsprechend modifiziertes tomografisches Rekonstruktionsverfahren nach sich zieht. So sind Anordnungen auf anderen gekrümmten oder stückweise geraden, möglichst geschlossenen Linien denkbar, wie Ellipsen oder Rechtecke.

Im Vergleich zu anderen Verfahren besitzt es eine hohe Resistenz gegen elektrische und mechanische Störungen. Die Energieankopplung über die stromführenden Elektroden bringt im Gegensatz zu mechanischen Energiequellen (Explosion oder Schlag bei seismischen Verfahren) keinerlei Probleme. Durch Veränderung der Stromstärke kann in verschiedenen elektrischen Leistungsbereichen ohne Schwierigkeiten gearbeitet werden.

Durch elektronisch steuerbare wiederholte Stromzuführung tritt ein Signalstapeffekt auf, der das Signal/Rausch-Verhalten des Verfahrens wesentlich verbessert.

Da ein zeitlich stationäres Spannungsfeld gemessen wird, entfallen die in der Seismik schwierig zu beherrschenden Probleme der Signalerkennung (Bestimmung der Ankunftszeiten einer seismischen Welle).

Eine sehr dichte Belegung der Meßfläche mit Dipol-Dipol-Anordnungen schafft bei nur geringer Erhöhung des Meßaufwandes eine wirksame Mehrfachüberdeckung des Untersuchungsobjektes. Im Gegensatz zur Seismik bleibt dabei die Umweltverträglichkeit erhalten. Es treten keine Beeinträchtigungen durch Lärm oder Geruch auf. Flurschäden sind nicht zu befürchten.

Die problemlose Erhöhung der Meßdichte erlaubt weiterhin die effektive Erhöhung des räumlichen Auflösungsvermögens und bietet die Voraussetzung für die Anwendung dreidimensionaler Bildbearbeitungsverfahren.

Das Meßverfahren läßt sich einfach durchführen und ist weitgehend automatisierbar.

Im folgenden werden das Verfahren und die Vorrichtung in mehreren Ausführungsbeispielen weiter ausgeführt.

Beispiel 1

Die Abb. 1 zeigt eine Meßanordnung zur räumlichen Erkundung und Untersuchung unterirdischer Objekte und Schichten, die aus n Elektroden E_i besteht, die auf einer gedachten Kreislinie angeordnet und zu Dipolen $E_i E_{i+1}$ zusammengeschaltet sind. Im Mittelpunkt dieser Anordnung ist die Mehrpol-Vertikalelektrode M_E vertikal in den Untergrund getrieben. Zwei Elektroden E_i sind als Stromdipol $E_A E_B$ definiert. Zu einem bestimmten Zeitpunkt sind die zwei Elektroden $E_M E_N$ als Sondendipol definiert. Die kreisförmig angeordneten Elektroden E_i sind mit dem Radius r ausgelegt. Der Abstand der durch zwei Elektroden gebildeten Dipole $E_A E_B$ oder $E_M E_N$ im Verhältnis zu dem Radius r der kreisförmig angeordneten Elektroden E_i beträgt zweckmäßigerweise zwischen 1 : 5 und 1 : 10.

Die Elektroden E_i sind über Verbindungskabel V mit der Steuerungseinheit S verbunden. Der Steuerungseinheit S sind Meßgeräte für Strom I und Spannung U sowie Datenlogger D nachgeschaltet. Die Steuerungseinheit S schaltet die Dipole nach einem vorgegebenen Programm so, daß immer einer der Dipole ein Stromdipol und die verbleibenden Dipole Sondendipole sind. Der vom Stromdipol abgegebene Strom baut ein Feld auf, dessen Stärke nacheinander durch die Sondendipole erfaßt und über die zuordnende Steuerungseinheit S den Meßgeräten für Strom I und Spannung U zugeführt und erfaßt wird. Sind alle Meßwerte erfaßt, bestimmt die Steuerungseinheit S einen zum bisherigen Stromdipol benachbarten Dipol als neuen Stromdipol und die übrigen als Sondendipole. Wiederum werden alle Meßwerte erfaßt. Dieser Wechsel wiederholt sich solange, bis alle Dipole mindestens einmal Stromdipol waren. Aus der Summe der Meßwerte ergibt sich ein dreidimensionaler Datensatz, der die Grundlage für die weitere Auswertung bildet. Mit den bekannten Bildrekonstruktionsverfahren lassen sich daraus horizontale oder vertikale Schnittflächen ableiten, aus denen die gewünschten Aussagen erhalten werden.

In einer speziellen Ausführungsform der Anordnung ist im Mittelpunkt die Mehrpol-Vertikalelektrode M_E angeordnet, die aus einem Mehrelektrodensystem mit einer Vielzahl von durch Isolatoren voneinander getrennten Elektroden besteht. Diese Elektroden werden durch die Steuerungseinheit S einzeln oder paarweise als Dipole geschaltet. Das sich aufbauende Feld wird durch die kreisförmig angeordneten Sondendipole erfaßt und ausgewertet. Diese Anordnung verbessert die Auflösung in z-Richtung.

Beispiel 2

Die Abb. 2 zeigt das Ergebnis der geoelektrischen Computertomographie eines unterirdischen Ganges unter dem Marktplatz einer sächsischen Kleinstadt. Horizontale tomographische Schnitte von etwa 8 m Durchmesser im Abstand von 0,1 m belegen die Existenz eines langgestreckten Hohlraumes von etwa 1 bis 2 m Breite. Das obere linke Tomogramm entspricht einem Schnitt in Oberflächennähe, das untere rechte einem Schnitt in ca. 4 m Tiefe. Die hellen Grautöne sind geringen Widerstandswerten (ungestörte Bereiche) und die dunklen Grautöne hohen Widerständen (Hohlräume) zuzuordnen. Der Gang ist unter Tage begehbar und diente als bekanntes Testobjekt. Gefunden wurde im linken oberen Bereich der Tomogramme — also oberflächennah — ein unbekannter sekundärer Hohlraum von etwa

1,5 m³ Volumen. Es handelt sich um eine Ausspülung, von Lockergestein aus den Hangenden in das Gangsystem. Falls keine Sanierungsmaßnahmen ergriffen werden, wird dieser Hohlraum in Kürze bis an die Oberfläche durchbrechen.

Beispiel 3

In Abb. 3 wird ein Hohlraumsystem unterhalb eines geplanten Baustandortes in einer sächsischen Kleinstadt aus computertomographischen Messungen dargestellt. Der übermessene Raum beträgt etwa 80 × 25 m in der Fläche und 8 m in der Tiefe. Die abgebildeten Widerstandsbereiche größer 300 $\mu\Omega$ sind Bereiche extremer Auflockerung des Baugrundes mit Hohlräumen (Kelleranlagen) in den Kernen.

Beispiel 4

Die Abb. 4 zeigt die tomographischen Horizontalschnitte durch ein neolithisches Großsteingrab in Sachsen-Anhalt. Der Grabhügel hat kegelförmige Gestalt (Höhe 6 m, Basisdurchmesser 40 m, Plateaudurchmesser 4 m). Das Dipol-Dipol-Elektrodenarray umspannt den Grabkegel in 4,5 in Höhe. Die Grabkammer (sogenannter Urdolmen) ist bereits durch eine archäologische Grabung aus dem Jahre 1901 nachgewiesen worden. Neben der zentralen Grabkammer sind die radial angelegten, wieder verfüllten Grabungsschnitte als Bereiche erhöhter Widerstandswerte schemenhaft sichtbar.

Patentansprüche

1. Verfahren zur räumlichen Erkundung und Untersuchung unterirdischer Objekte und Schichten, bei dem elektrischer Strom über eine als Stromdipol ausgebildete Erdung in den Boden eingespeist wird und das sich aufbauende elektrische Feld durch einen Sondendipol gemessen und aus der Messung von Strom und Spannung der elektrische Widerstand und die Leitfähigkeit des Untergrundes bestimmt wird, wobei eine Zentraleinheit zwischen Stromdipol, Sondendipol und Meß- und Aufzeichnungsgeräten vermittelt, **dadurch gekennzeichnet**, daß eine Vielzahl von paarweise zu Dipolen zusammengeschalteten Elektroden eingesetzt wird, diese Dipole einfach oder mehrfach eine Ring bildend, mit einem diagonalen Abstand in Abhängigkeit von der zu sondierenden Tiefe über dem zu erkundenden oder zu untersuchenden Untergrund ausgelegt und diese Dipole über eine elektronisch getaktete Steuerung mit Gleichstrom oder niederfrequentem Wechselstrom in der Weise angesteuert werden, daß die Steuerungseinheit immer einen Dipol aus der Vielzahl der Dipole als Stromdipol und alle anderen als Sondendipole definiert und danach nacheinander ein- oder mehrkanalig die Spannungswerte der einzelnen Sondendipole durch das mit der Steuerungseinheit verbundene Meßgerät mit Datenlogger erfaßt werden, nach Abschluß der Erfassung der Werte aller Sondendipole die Steuerungseinheit einen benachbarten Dipol als Stromdipol bestimmt und danach wiederum die Spannungswerte der als Sondendipole verbleibenden Dipole erfaßt werden und die Steuerungseinheit diesen Wechsel des Stromdipols solange durchführt, bis alle Dipole mindestens einmal als Strom-

dipol durch die Steuerungseinheit definiert waren, woran sich die Auswertung der erfaßten Strom- und Spannungswerte anschließt, indem mittels eines potentialtomographischen Bildrekonstruktionsverfahrens die von den Dipolpaaren an der Erdoberfläche gemessenen scheinbaren spezifischen Widerstände invers zu dem erregenden elektrischen Feld in die lagegetreue Quellverteilung der wahren spezifischen Widerstände im Untergrund transformiert und räumlich dargestellt werden, wobei aus dem dreidimensionalen Datensatz meist horizontale oder vertikale Schnittflächen ausgegeben und für die weitere Auswertung bereitgestellt werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Dipole kreisförmig um den Mittelpunkt angeordnet werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß zur flächenhaften Sondierung ausgedehnter Objekte und Schichten die Dipole wiederholt nach der Erfassung der Spannungswerte seitlich versetzt werden.

4. Verfahren nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß zur Verbesserung der Auflösung in z-Richtung eine oder mehrere innerhalb der ringförmig ausgelegten Dipole angeordnete und senkrecht in den Untergrund getriebene Mehrpol-Vertikalelektroden mit einer Vielzahl von durch Isolatoren voneinander getrennten Elektroden angeordnet werden, die nacheinander einzeln oder paarweise von der Steuerungseinheit mit einem Strom definierter Stärke beaufschlagt werden und das sich aufbauende Feld durch die Sondendipole erfaßt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß zur Fokussierung des sich durch den Stromdipol ausbildenden Feldes durch die Steuerungseinheit auf beiden Seiten des Stromdipols je ein benachbarter Dipol zusätzlich mit Strom beaufschlagt wird.

6. Anordnung zur räumlichen Erkundung und Untersuchung unterirdischer Objekte und Schichten, bestehend aus Stromdipol und Sondendipol in Verbindung mit Meßgeräten zur Erfassung von Strom und Spannung mit dem Ziel der Bestimmung des elektrischen Widerstandes und der Leitfähigkeit des Untergrundes sowie einer Zentraleinheit zur Vermittlung zwischen den bezeichneten Baugruppen, dadurch gekennzeichnet, daß eine Vielzahl von wechselseitig als Strom- oder Sondendipol einsetzbaren Dipolen ($E_i E_{i+1}$) einfach oder mehrfach einen Ring bildend, mit einem diagonalen Abstand in Abhängigkeit von der Sondierungstiefe über dem zu erkundenden oder zu untersuchenden Untergrund angeordnet sind, die Dipole ($E_i E_{i+1}$) über Verbindungskabel (V) mit einer Steuerungseinheit (S) verbunden sind, die jeweils einen der Dipole ($E_i E_{i+1}$) als Stromdipol ($E_A E_B$) und die verbleibenden als Sondendipole ($E_M E_N$) und deren nachfolgenden Wechsel festlegt, und der Steuerungseinheit (S) Meßgeräte für Strom (I) und Spannung (U), Datenlogger (D) und Stromquelle sowie eine Einheit zur Erfassung der Spannungswerte und deren nachfolgende Verarbeitung nach einem potentialtomographischen Bildrekonstruktionsverfahren nachgeschaltet ist.

7. Anordnung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Dipole ($E_i E_{i+1}$) kreisförmig um

den Mittelpunkt angeordnet sind.

8. Anordnung nach Anspruch 6 und 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Dipolabstand im Verhältnis zum Radius der kreisförmig angeordneten Dipole ($E_i E_{i+1}$) im Bereich zwischen 1 : 5 und 1 : 10 liegt. 5

9. Anordnung nach Anspruch 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß innerhalb des sich bildenden Arrays eine oder mehrere Mehrpol-Vertikalelektroden (M_E) mit durch Isolatoren getrennten Elektroden angeordnet sind, die mit der Steuerungseinheit (S) über Verbindungskabel (V) verbunden sind. 10

10. Anordnung nach Anspruch 6 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß dem Stromdipol beidseitig benachbart je ein als zusätzliche Stromquelle geschalteter Dipol angeordnet ist. 15

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

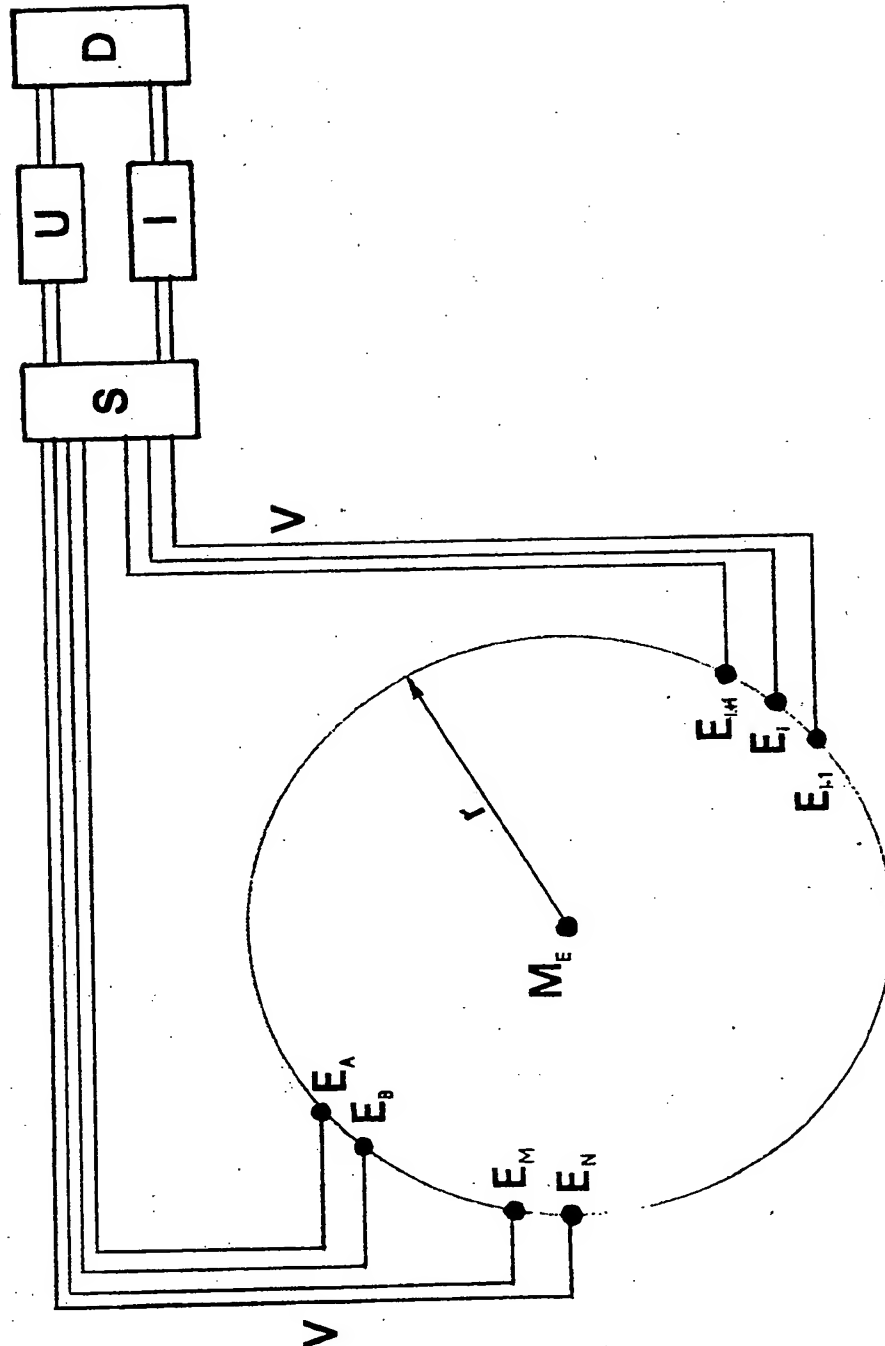


Abb. 1

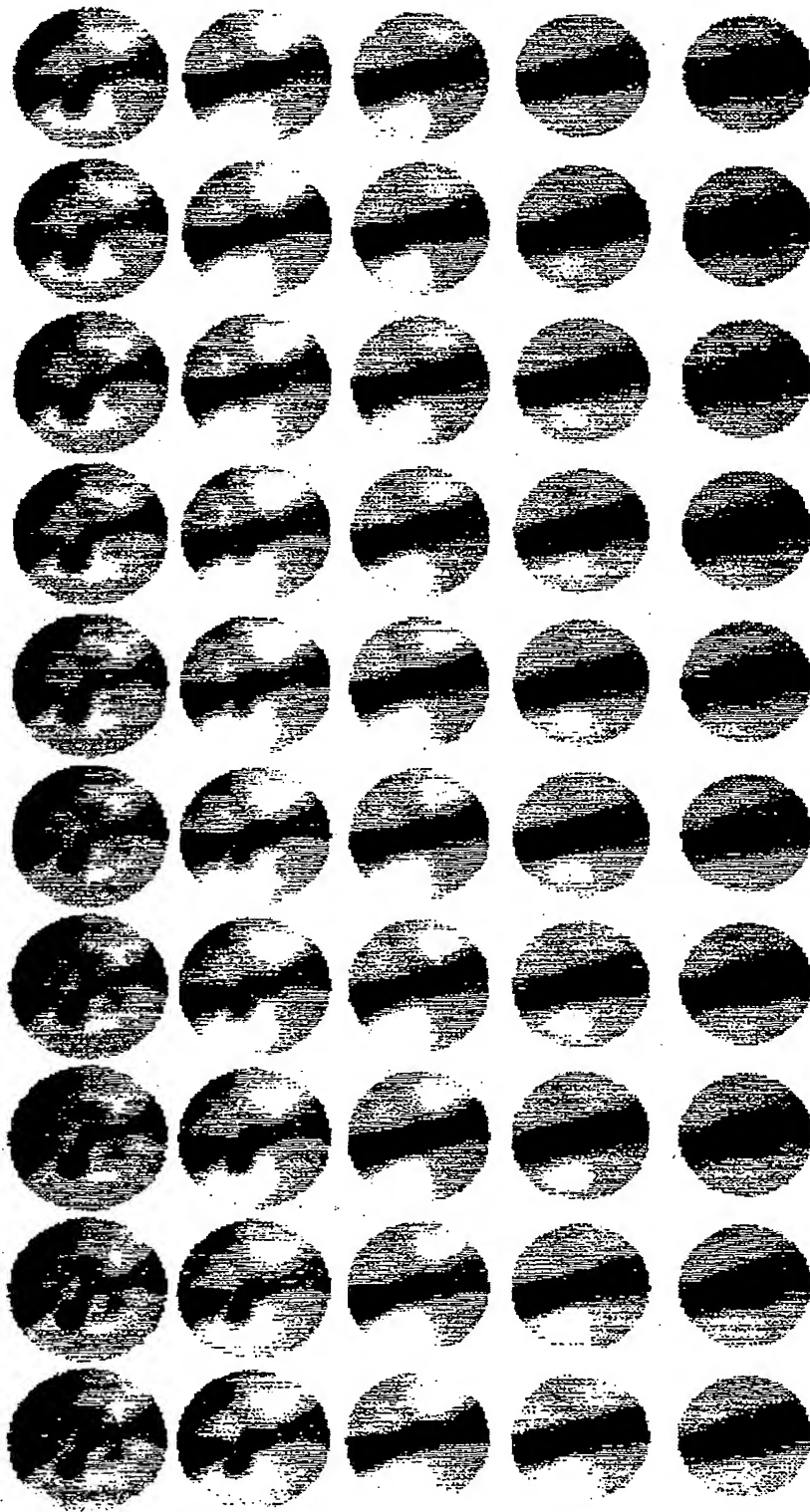
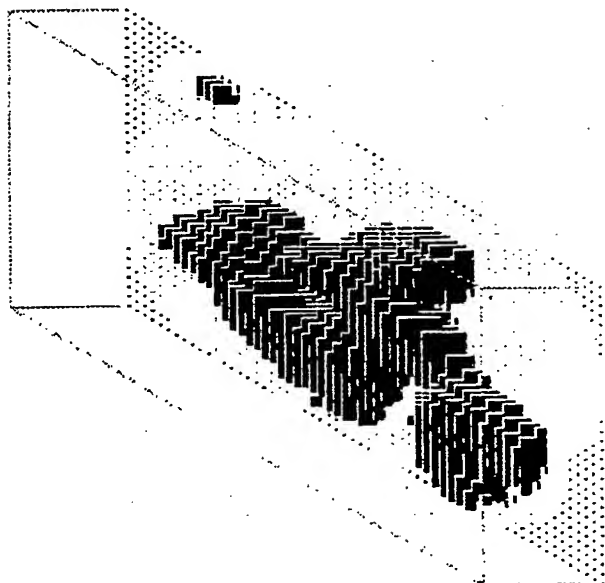
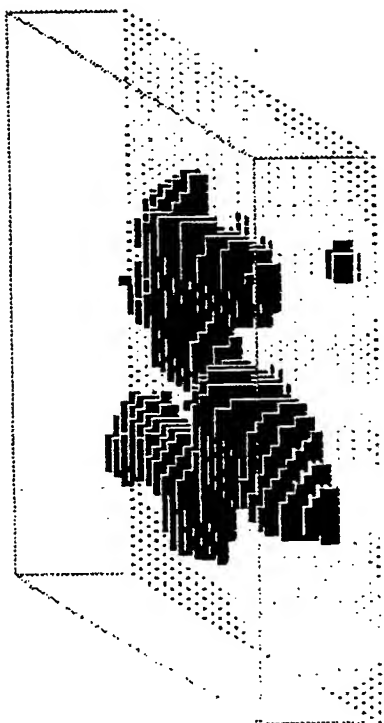


Abb. 2



1500 Ω m

5.0

Abb. 3

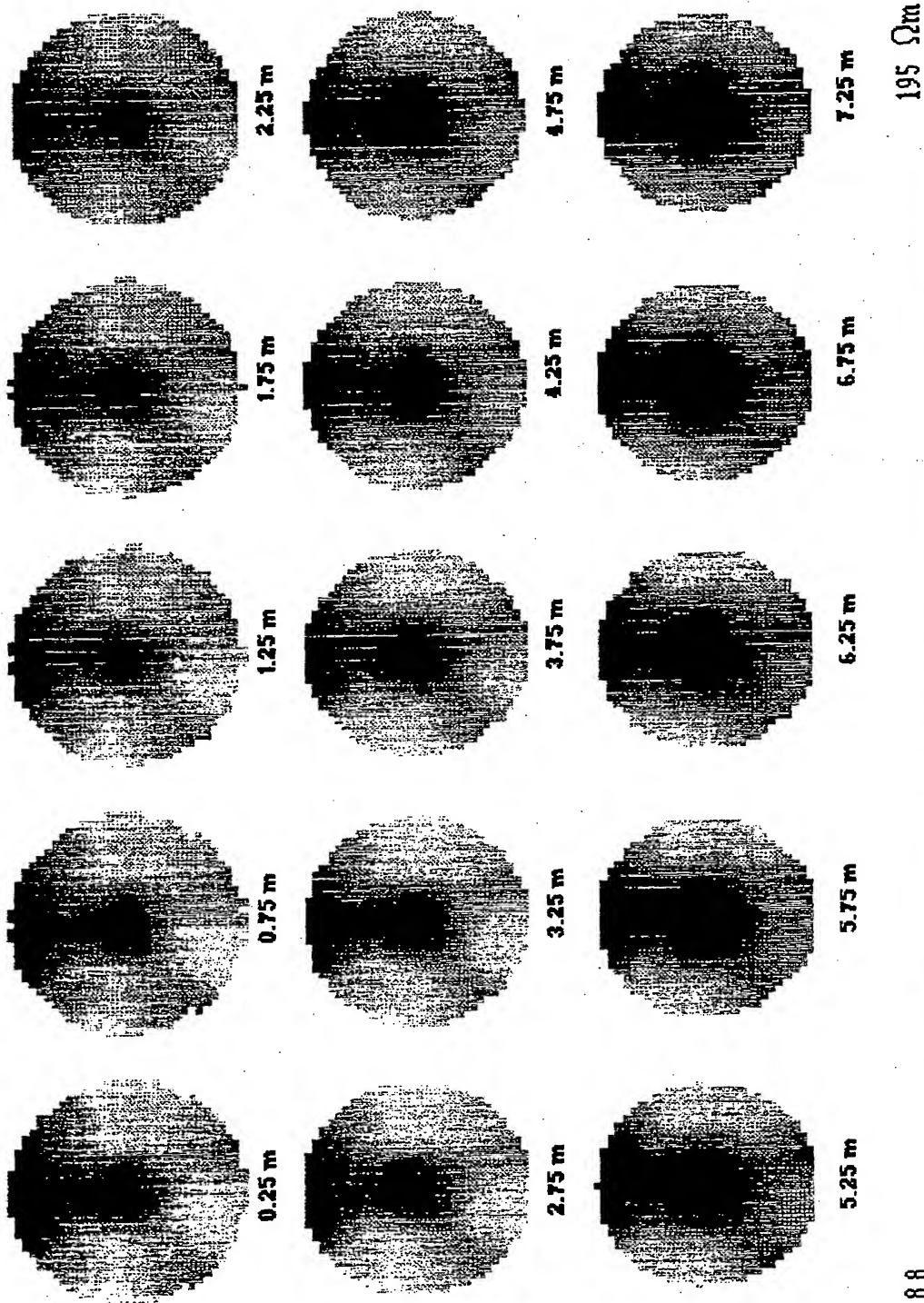


Abb. 4